

## **SISTEMA DE CALEFACCIÓN RADIANTE SOLAR PASIVO DISEÑO, CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS**

**M. Victoria Mercado<sup>1,4</sup>; Alfredo Esteves<sup>2,4</sup>; Celina Filippín<sup>2,5</sup>; Silvana Flores Larsen<sup>3,6</sup>**

<sup>4</sup>Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda (LAHV), (INCIHUSA)

Centro de Ciencia y Técnica (CCT) (CONICET)

Avda. Ruiz Leal s/n Parque General San Martín (5500), Mendoza, Argentina

E-mail : [mvmercado@lab.cricyt.edu.ar](mailto:mvmercado@lab.cricyt.edu.ar)

<sup>5</sup>Universidad Nacional de La Pampa-CONICET-Spinetto 785-(6300) Santa Rosa, La Pampa

<sup>6</sup>INENCO-Universidad Nacional de Salta-CONICET. Avda. Bolivia 5150 (4400) Salta

*Recibido: 25-03-09 ; Aceptado:20-04-09.*

**RESUMEN.-** En el aprovechamiento solar para calefaccionar edificios resulta imprescindible, una fachada disponible hacia el Ecuador, sobre la cuál "instalar" los sistemas solares pasivos de calefacción. En este sentido se estudia un sistema de calefacción radiante solar pasivo para viviendas "sin fachada norte disponible", tomando como eje primordial el intercambio de calor por radiación. Se evalúa su diseño, el comportamiento en diferentes estadios y la construcción de un prototipo escala 1=1. Se trata de un sistema eficiente para elevar la temperatura operativa del espacio por intercambio radiante hasta alcanzar niveles de confort. Con el sistema en funcionamiento, la temperatura operativa resulta 12°C mayor que la temperatura exterior, logrando que el usuario sienta confort térmico en el espacio. Al mismo tiempo la necesidad de energía de base fósil descende, evitando la emisión de 700m3/anuales de CO2 a la atmósfera, por espacio que utilice el sistema propuesto como dispositivo de calefacción. Se propone principalmente el sistema para la rehabilitación térmico-energética de vivienda social o de bajo costo, que generalmente presentan una mala calidad térmica en sus espacios y que no poseen la fachada norte disponible para la captación de energía solar dada su condición de colindancia y ubicación en el tramado urbano.

**Palabras claves:** Sistemas solares pasivos, Transferencia de calor por radiación, Ahorro energético, Rehabilitación térmico-energética de arquitectura social.

### **THERMAL CEILING, RADIATING PASSIVE SOLAR SYSTEM. DESIGN EVALUATION And CONSTRUCCION OF A PROTOTYPE**

**ABSTRACT.-** A passive solar heating system for houses without North facade available is studied, based on radiant heat transfer. The system design, its behavior at different stages, and the construction of a prototype at 1 = 1 scale are described. The system will be applied for the rehabilitation of social and low cost housing which usually are thermally uncomfortable and whose northern facade is unavailable. The system can raise the operating temperature of the room to reach an adequate comfort level, by using radiant heat transfer. The system provides an option for the refurbishment of social housing that does not have a North facade for solar collection, avoiding the emission of 700m3/year of CO2. The system is mainly for the rehabilitation of thermal-energy social housing or low cost, which generally have a poor thermal quality in their areas and do not have available façade's north for solar energy due to its location and condition of surrounding in the urban fabric.

**Keywords:** Passive Solar System, Radiant heat transfer, Energy saving, Sustainable social architecture.

#### **1. INTRODUCCIÓN**

Desde el año 2005 la Argentina ha sufrido cada invierno una crisis energética de transporte y disponibilidad de gas natural. Esto impacta en el mayor uso de gas envasado como fuente energética de muchas viviendas del sector poblacional de menores recursos.

La crisis energética mencionada, cíclica en cada invierno, obliga a esta franja poblacional a vivir fuera de los niveles mínimos de confort térmico. En la República Argentina se estima que entre el 35% y 40% de todos los recursos energéticos primarios utilizados es destinado al acondicionamiento del hábitat construido. De esto, el 53% es destinado al uso residencial y cerca del 58% de la energía residencial es utilizada para calefacción (Evans, 2005).

La rehabilitación energética de las viviendas, por medio de sistemas de acondicionamiento solar pasivo es una solución válida ante esta crisis, ya que es posible: a) alcanzar

<sup>1</sup>Becaria Doctoral II-CONICET

<sup>2</sup>Investigador Independiente - CONICET

<sup>3</sup>Investigador Asistente - CONICET



condiciones de confort sin mayor consumo de energía, b) disminuir el consumo de energía fósil para igual confort y c) reducir en este caso las emisiones contaminantes.

### 1.1 Situación de la vivienda social en la Provincia de Mendoza.

El Instituto Provincial de la Vivienda de la provincia de Mendoza declara un déficit habitacional de 119500 hogares (IPV, 2001). Este déficit provoca que el destino de fondos se oriente a construir mayor cantidad de viviendas en desmedro de su calidad térmica. Como el déficit se incrementa con el crecimiento poblacional, se genera un círculo que resulta difícil de revertir. Los índices de déficit de viviendas se enmarcan en la situación de hacinamiento y estado material de las viviendas. Se observa que, en ninguno de estos índices considerados para la elaboración de los censos, se cuenta o evalúa la calidad térmica de la vivienda ni de su envolvente en forma global. (Mercado et al, 2007).

Además de esta situación, se cuenta con un parque habitacional construido en las últimas tres décadas, que conforman aproximadamente el 30% del total de viviendas del área metropolitana de Mendoza siendo grandes consumidores de energía.

En estas edificaciones, la mayor parte de la energía consumida para calefacción se pierde debido a insuficiente aislamiento o a un inadecuado diseño que no considera las condiciones climáticas locales (Mercado y Esteves 2005). Este problema se agudiza en el caso de las viviendas sociales donde las restricciones económicas limitan las posibilidades de alcanzar un comportamiento energético más eficiente. Esto provoca situaciones de discomfort general y poca salubridad.

### 1.2. La envolvente de la vivienda y su calidad térmica

La envolvente de un edificio intercambia energía con el medio ambiente a través de sus elementos. *"El funcionamiento o desempeño de un sistema de calefacción en términos de confort alcanzado de modo natural está influenciado por el nivel de aislación térmica"* (Goulding et al, 1994). Esto explica de una forma clara la importancia de una buena calidad térmica en la envolvente de cualquier edificio.

En el caso de la vivienda social la importancia toma mayor relevancia, dado que los sistemas de calefacción funcionan en base a energías convencionales de base fósil. Por lo tanto de acuerdo al nivel de ingresos económicos del usuario, se encuentran dos situaciones posibles:

- a- el usuario se ve imposibilitado a pagar el costo energético que una vivienda de mala calidad térmica genera y se encuentra obligado a vivir en condiciones de discomfort "dentro de su hogar", ó
- b- en el caso de que el usuario pueda hacer frente al costo económico de la energía requerida para mantener la vivienda confortable, como sociedad nos enfrentamos a la problemática del fuerte impacto ambiental que estos consumos ocasionan. La participación del sector residencial en el total de la energía consumida en la provincia de Mendoza es del 27.7%. De este porcentaje el 41.1% es utilizada para

calefacción y el 32.6% para calentamiento de agua, siendo el combustible utilizado en ambos casos el gas natural (Mesa, 2008).

Para una vivienda social de construcción tradicional, los materiales que se utilizan en general son muros de ladrillo y cubiertas livianas. El valor estándar de transmitancia térmica global U, de un muro de ladrillón con revoque en ambos lados es de 2.41 W/m<sup>2</sup>C. Para una cubierta compuesta de machimbre, poliestireno expandido de 0.025cm de espesor y chapa ondulada el U es 1,00 W/m<sup>2</sup>C. Los valores que regulariza la norma IRAM 11605 en su nivel C (el mínimo reglamentario), son 1.75 W/m<sup>2</sup>C para paramentos verticales y de 1.00 W/m<sup>2</sup>C para cubiertas. Se puede observar que la cubierta alcanza el valor estipulado como mínimo, sin embargo los muros de ladrillón no, lo que implica que numerosas viviendas construidas y a construir no entran dentro de la norma.

Teniendo en cuenta esta situación, es necesario reciclar los edificios para mejorarlos desde el punto de vista térmico. Esto ya lo advirtió Olgyay 45 años atrás.

*"El hombre se esfuerza por llegar al punto en que adaptarse a su entorno le requiera solamente un mínimo de energía.... La vivienda es el principal instrumento que nos permite satisfacer las exigencias de confort adecuadas. Modifica el entorno natural y nos aproxima a las condiciones óptimas de habitabilidad. Debe filtrar, absorber o repeler los efectos medioambientales según influyan positivamente o negativamente en el confort del ser humano"* (Olgyay, 1963).

### 1.3. El confort y la habitabilidad de los espacios

El ser humano se mantiene activo en busca permanente de su confort. La definición de confort general indica que es una sensación de bienestar completo, físico y mental. Se entiende como "completo", tanto la situación térmica, lumínica y acústica, como a la psíquica, de salubridad y hasta económica a la que se encuentra sometida una persona. Para este trabajo se hace hincapié en el aspecto térmico del confort, origen de los problemas ambientales y de muchas enfermedades pulmonares que padecen los usuarios de las viviendas frías, en especial los niños y ancianos de familias de escasos recursos.

Las normas internacionales describen al confort térmico como "la sensación térmica que está principalmente relacionada con el balance térmico del cuerpo humano como un todo. Este balance dependerá de la actividad metabólica y la vestimenta, y es influenciado por los parámetros ambientales: temperatura del aire, temperatura media radiante, velocidad del aire y humedad del aire" (ISO 7730:1994).

El intercambio de calor del cuerpo humano hacia el ambiente se realiza a través de cuatro mecanismos: convección, radiación, conducción y evaporación. Estos procesos son los que utiliza el cuerpo para buscar el confort térmico. En estado de equilibrio térmico, el cuerpo humano transfiere el 42 % de su energía por radiación (en cuyo cálculo interviene la Temperatura Radiante Media), el 32% por convección y conducción (en las que incide la velocidad de aire y nivel de vestimenta, -clo-) y el 26% por evaporación (en la que participa la humedad relativa y el



nivel de actividad, -met-), ( Cammerer, 1959 en Banhidi, 1991).

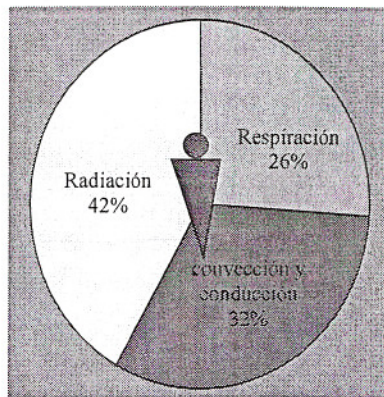


Fig. 1: Intercambio de calor del cuerpo en estado de equilibrio.

### 1.3.1. Calefacción con sistemas radiantes

La calefacción por sistemas radiantes ha presentado numerosas ventajas en comparación con los sistemas de calefacción convectiva.

En la calefacción radiante, el sistema intercambia calor con las superficies presentes en el espacio y con el cuerpo humano. A su vez, al calentarse las superficies se produce un segundo intercambio entre éstas y el cuerpo humano. Lo que genera la sensación de calor envolvente que percibirá el individuo.

Los sistemas convectivos calientan el aire, el cual se enfría rápidamente a causa de su baja densidad y baja capacidad de acumulación. Debido a la menor densidad del aire caliente, en la habitación se produce la estratificación térmica del aire, la cual en algunos casos puede exceder el límite del confort. A modo de ejemplo, para un espacio industrial, con la utilización de calefacción convectiva el gradiente térmico es de alrededor de 1.25°C/m, mientras que con un sistema de calefacción radiante cenital, este valor decrece a 0.25°C/m (Bánhidi, 1991).

En una vivienda social tipo, donde la altura normalmente es de 2.5m la estratificación sería de 3.1 °C, mientras que para un sistema radiante es de 0.6°C. El sistema de calefacción por radiación calienta más rápidamente los cuerpos sólidos del espacio, que almacenan calor en su masa térmica. Esto permite mantener las condiciones de confort de un modo más eficiente y con menor consumo energético (ahorros energético del 10% al 40% según Bánhidi, 1991).

La calefacción radiante resguarda la calidad del aire interior, siendo una de las ventajas más importantes que presentan estos sistemas frente a los sistemas de calefacción convectiva. Los niveles elevados de contaminantes generados por combustión: monóxido y dióxido de carbono (CO, CO<sub>2</sub>) óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), partículas y formaldehído, en espacios interiores, proceden por lo general de artefactos de calefacción de gas, cocinas y hornos. Los sistemas de calefacción convectiva mencionados, calientan el aire produciendo contaminación interior cuando la ventilación es insuficiente.

Cuando las personas no pueden calefaccionar por el costo energético y utilizan el "brasero" se someten a intoxicación por CO (monóxido de carbono) que ya ha cobrado varias vidas en ambientes de bajos recursos. Contar con un sistema solar económico y de fácil construcción se constituye en una necesidad.

En conclusión, frente a los sistemas de calefacción convectiva que son muy utilizados y difundidos por su economía de adquisición, los sistemas de calefacción por intercambio radiante inciden con mayor efectividad en el confort térmico, además de ser energéticamente más eficientes y salubres para la calidad del aire interior.

#### 1.3.1.1. Factores que participan en el intercambio radiante.

**Factor de forma (ff):** llamado también factor de vista o factor de ángulo. Determina que fracción de radiación emitida por una superficie es interceptada por una segunda superficie. Se utiliza para el cálculo de la temperatura radiante media. Existen varios métodos para su obtención, en el presente trabajo se ha utilizado el método de Chrenko y el método de Fanger (Banhidi, 1991).

**Emisividad (E):** propiedad física de la superficie de los cuerpos que indica qué calidad de emisor es un cuerpo en comparación con el cuerpo radiante ideal (Incropera y DeWitt, 1981).

**Temperatura Radiante Media (TRM):** es la temperatura ficticia uniforme de un local negro imaginario a la cual un cuerpo intercambia por radiación la misma cantidad de calor que en el local real. Puede ser estimado como un promedio ponderado de las temperaturas de las superficies sólidas que rodean a la persona (Goulding, 1994). Cuando los elementos sólidos tienen diferentes temperaturas su valor depende de la posición en que se ubica la persona dentro de la habitación, es decir, de la mayor o menor distancia a los elementos radiantes interiores.

**Temperatura Operativa (TO):** es el resultado de la combinación lineal entre la temperatura del bulbo seco TBS y la TRM. Es la temperatura real que percibirán los ocupantes de un espacio. Al incrementarse la TBS o TRM, aumentará consecuentemente la TO. Para mantener una TO constante, es posible aumentar la TRM y mantener baja TBS o viceversa.

$$To = \frac{TBS + TRM}{2} \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (1)$$

### 1.4. Acondicionamiento térmico con estrategias bioclimáticas

La incorporación de sistemas solares pasivos es una importante herramienta para la rehabilitación energética de cualquier edificio. Son sistemas de fácil construcción y de operación simple por parte de los ocupantes. Las condiciones climáticas de la ciudad de Mendoza son propicias para el uso de estos sistemas, irradiación solar global promedio de los meses de invierno (junio, julio y agosto) de 2.8kW/m<sup>2</sup> y una heliofanía efectiva diaria promedio para los mismos meses de 6.0 horas (Grossi Gallegos y Raúl Rhigini, 2004), con baja velocidad de viento durante la mayor parte del año.

Los sistemas solares pasivos se clasifican en dos grupos: los sistemas de ganancia directa (se encuentran generalmente dentro del espacio a calefaccionar) y los de ganancia



indirecta (por lo general son adosados al espacio a acondicionar) El diseño solar pasivo posee algunas características básicas presentadas a continuación (Athienitis y Santamouris, 2002):

- a- transmisión o absorción de la mayor cantidad posible de la energía o radiación solar.
- b- utilización de la ganancia solar, sea acumulándola, o entregando la carga térmica al espacio.
- c- reducción de las pérdidas de calor
- d- utilización de sistemas de control y protección
- e- utilización de la ventilación natural
- f- integración del sistema solar pasivo con el sistema de acondicionamiento mecánico utilizado en el edificio.

El requerimiento básico para rehabilitar una vivienda con algún tipo de sistema solar pasivo es que posea una fachada o vista orientada hacia el ecuador. Sin embargo, esta orientación no siempre esta disponible en viviendas que se ajustan a formas urbanas en damero, que poseen el mismo diseño cualquiera sea su orientación y ubicación en la manzana. Además, en muchas ocasiones, por reducir costos se aparean sobre su lado norte, eliminando la fachada en esta orientación (Figura 2).

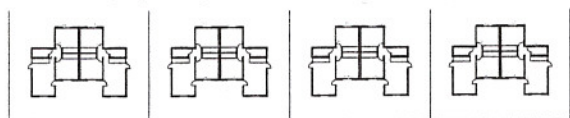


Fig. 2. Esquema de viviendas apareada, con delimitación lateral de lote.

### 3. DISEÑO Y ESTUDIO DEL SISTEMA SOLAR DE CALEFACCIÓN RADIANTE.

Como respuesta a la situación presentada se plantea un sistema solar pasivo de ganancia indirecta, ubicado en la cubierta de la vivienda, la cuál en general está libre de obstrucciones. Este sistema ofrece una alternativa para restituir las condiciones de confort a la población que vive en viviendas térmicamente precarias.

El sistema propuesto es de forma piramidal alargada creando un recinto cerrado, tipo lucernario, de captación indirecta, sin acumulación de calor, el cuál se ubica dentro de un recinto cerrado donde la disipación de calor se realiza principalmente por medio del intercambio radiante (Mercado y Esteves, 2005). (Figura 3).

Las funciones básicas del sistema propuesto son: captación, absorción y transmisión del calor, protección y reflexión.

La *captación* (a) se materializa por tres lados que lindan al exterior con vidrio común. Uno de ellos se encuentra hacia el norte inclinado en  $\beta=45^\circ$ , siendo el de mayor superficie, los dos restantes componen los tímpanos del sistema.

La superficie en contacto con el interior del espacio a calefaccionar es un panel metálico denominado *panel radiante*, que constituye el elemento encargado de la *absorción y transmisión* de la energía solar como calor a la habitación. Debido a la baja inercia térmica del panel metálico, se obtiene una entrega casi inmediata del calor captado por el metal al ambiente interior. El panel posee alta absorción ( $\alpha=0.95$  pintura negro mate) sobre la superficie

captadora de radiación solar y alta emisividad ( $\epsilon=0.9$ ) en el lado posterior a fin de favorecer la transferencia radiativa.

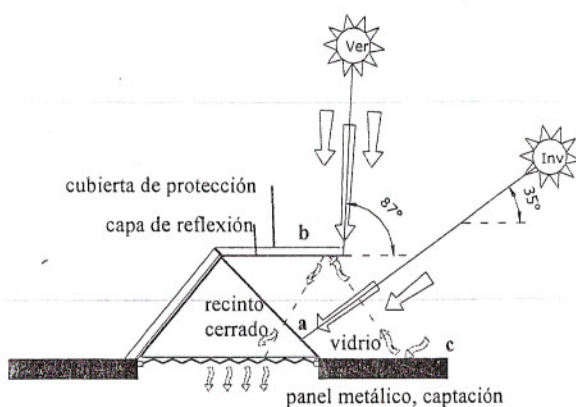


Fig. 3. Esquema de sistema propuesto

Del lado contrario a la mayor superficie de captación (orientada hacia el ecuador) posee una cubierta opaca que proporciona *protección* en verano. Es un elemento que minimiza la captación de radiación solar en el período mencionado para evitar sobrecalentamiento e inconformidad térmica. Todo el sistema de protección, (alero y cubierta sur) cuenta con aislación hidrófuga, la cubierta sur posee también aislación térmica.

Por último la *reflexión* (c) se utiliza para maximizar la ganancia solar en el período invernal. La superficie reflexiva se ubica en la superficie inferior del elemento de protección y en el interior de la cara sur.

#### 3.1. Metodología de estudio y análisis del sistema propuesto

El estudio se dividió en etapas progresivas.

Se estudio el sistema en un modelo a escala  $1=2$  permitiendo una mejor manipulación del sistema. De esta forma se obtuvo un primer indicio del comportamiento real del sistema. (Mercado y Esteves, 2006).

Luego se ingresó el modelo en el programa de simulación SIMEDIF para WINDOWS (Flores Larsen et al, 2000), y se ajustó con datos experimentales. Luego se evaluó el comportamiento del sistema en otras orientaciones y para días representativos a los meses del período invernal de la ciudad de Mendoza.

Por ultimo, se construyó un prototipo del sistema en escala  $1=1$ . Se ensayaron diversos materiales como paneles radiantes (chapa ondulada, chapa perforada, chapa lisa y chapa lisa combinada con placas translucidas de policarbonato, cajas de vidrios con agua y tabiques de hormigón de 3cm de espesor). En este trabajo se presentan los resultados del espacio con el panel de chapa ondulada.

## 4. RESULTADOS

#### 4.1. Estudio en modelo a escala.

Se construyó un modelo escala  $1=2$  de un ambiente de  $3\text{m} \times 3\text{m}$  y  $2.5\text{m}$  de altura. Las dimensiones del modelo fueron de  $1.5\text{m}$  de lado y  $1.25$  de alto, con una superficie de panel del 25% del área del espacio de chapa ondulada



(figura 5). Del mismo modo se tuvieron presente las características de una construcción típica de la ciudad de Mendoza, (ladrillo macizo de 0.18 m x 0.07 m x 0.28 m) con revoques en ambos lados. La conductancia térmica de este cerramiento es de  $K=2.41\text{W/m}^2\text{C}$ . Al armar el modelo se le otorgó igual conductancia en sus cerramiento que el muro mencionado (Mercado y Esteves, 2006).

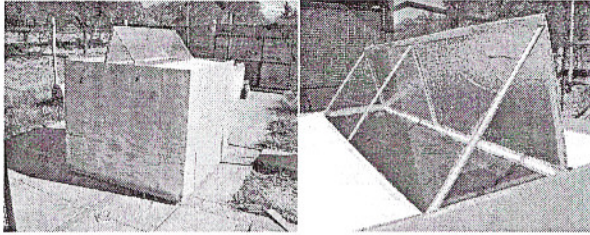


Fig. 5. Prototipo del sistema y un espacio en escala 1=2

Para la evaluación de la respuesta térmica del sistema en el espacio se efectuaron mediciones de temperatura radiante en todo el espacio por medio de globo negro. Esta metodología consiste en esferas pintadas negras con un sensor data logger HOBO con termocupla tipo T dentro de ellas (Fuller Moore, 1982). Para la ubicación de los globos negros se diseñó una grilla. En la figura 6 se puede observar el trazado de la grilla con respecto al sistema y la ubicación de las esferas. Además se tomaron registros de temperatura del panel con una termocupla tipo T, registro de temperatura de aire interior y exterior, conjuntamente con la radiación solar sobre superficie horizontal.

Las mediciones se realizaron para dos situaciones: sin la incorporación del sistema de calefacción radiante solar pasivo y posteriormente con el sistema integrado.

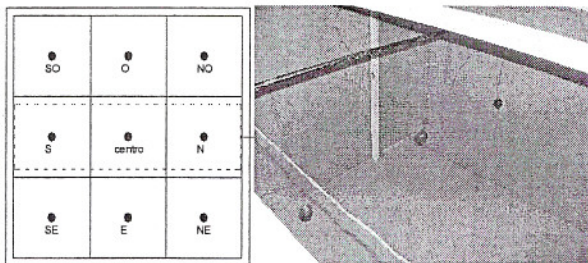


Fig. 6. Esquema de la grilla de puntos de medición y fotografía de ubicación de los globos negros en el prototipo.

En las figuras 7 y 8 se observa el resultado de las mediciones en el modelo en ambas situaciones. En la figura 7 SIN el sistema incorporado y en la figura 8 CON el sistema incorporado. En ambos casos se calcula la TO en el centro y en la esquina SO del prototipo. Se advierte la diferencia entre la temperatura operativa en el espacio sin sistema (similar a la temperatura del aire interior), en contraste con la TO obtenida en el espacio con sistema que alcanza condiciones de confort para un día de invierno. La TO se eleva  $12^{\circ}\text{C}$  por encima de la exterior, para un punto en el centro del espacio (debajo del panel radiante). La temperatura del panel registrada para el mediodía solar alcanza  $70^{\circ}\text{C}$ .

Posteriormente se tomaron registros de temperaturas superficiales en el interior del prototipo, a fin de evaluar la

respuesta de las superficies al intercambio radiante y su influencia directa sobre la TRM. La figura 9 muestra los datos horarios medidos y calculados de la TRM, para el punto centro del modelo, teniendo en cuenta el factor de forma para el cálculo según las temperaturas superficiales. Es posible advertir la influencia que tiene el sistema sobre la TRM y consecuentemente prever la situación favorable de la TO.

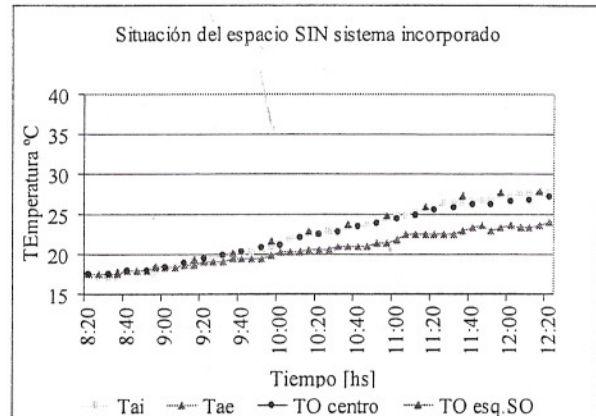


Fig. 7. Temperaturas resultantes en el espacio SIN el sistema incorporado

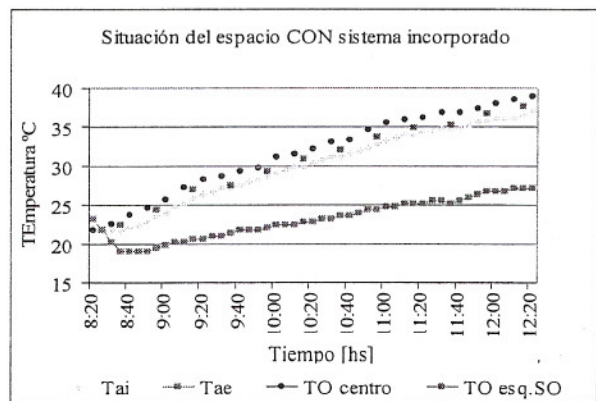


Fig. 8. Temperaturas resultantes en el espacio CON el sistema incorporado

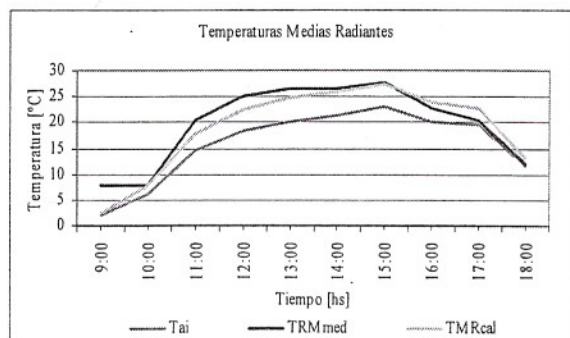


Fig. 9. Evolución de La TRM en relación de la incorporación del sistema

#### 4.2. Estudio con programa de simulación

Se realizó una simulación en el programa SIMEDIF para WINDOWS (Flores Larsen y Lesino, 2000). El objetivo de



las simulaciones fue trasladar el comportamiento del sistema a un período de invierno completo (junio, julio y agosto) y para distintas orientaciones (Norte, Este y Oeste).

El ingreso de datos al programa se realizó de la siguiente manera: la habitación y el recinto como dos locales por separado, local 1 y 2 respectivamente, para el período de 5 días comprendido entre 28 de Julio y 1 de Agosto del año 2006. Todos los cerramientos se consideraron como tabiques, con un coeficiente de conducción de  $2.4 \text{ W/m}^2\text{C}$ , representando los de muros de ladrillo macizo. El panel radiante se consideró como una pared para poder obtener su temperatura superficial, se utilizó el espesor y los valores correspondientes al metal siendo  $K = 63 \text{ W/m}^2\text{C}$ , densidad  $= 7800$ ,  $C_p = 454 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ . Como coeficientes convectivos externos se empleó un valor de  $20 \text{ W/m}^2\text{C}$  para tabiques que reciben radiación solar. Los coeficientes convectivos interiores se fijaron en 7 para superficies verticales y 9 para superficies horizontales en tabiques del espacio que simula la habitación y 5 para el espacio que simula el recinto cerrado del sistema. El número de renovaciones de aire por hora de cada local se fijó en 1 y 0.1, para una situación de renovación normal y otra de aire estanco respectivamente. La simulación del modelo resultó con ajuste de  $R^2=0.92$  (Figura 10), se considera satisfactoria.

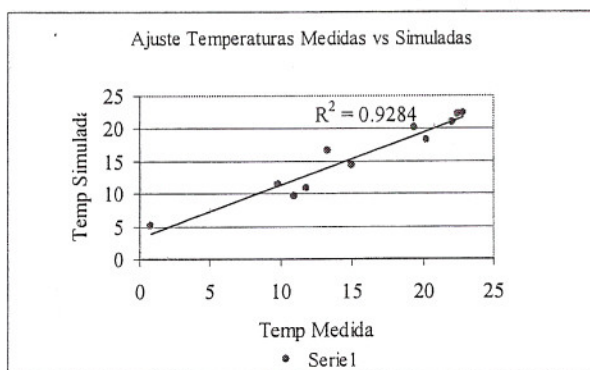


Fig. 10. Relación de Ajuste entre las temperaturas interiores obtenidas por Medición y Simulación.

El modelo ajustado se utilizó para simular días típicos de los meses de invierno, junio, julio y agosto.

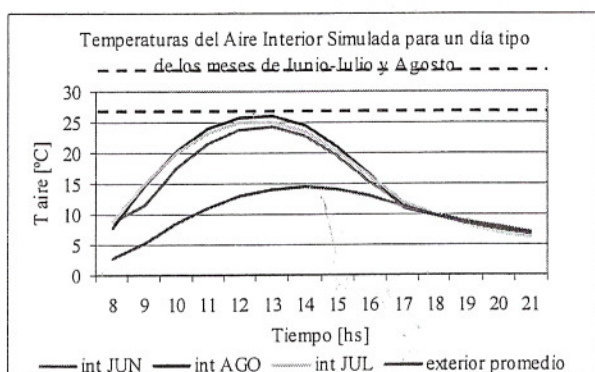


Fig.11. Evaluación de la Tai en un periodo invernal (junio-julio y agosto)

En la figura 11 se puede observar que la temperatura del aire interior alcanza el rango de confort ( $18^\circ\text{C}$ - $25^\circ\text{C}$ ) en las horas diurnas, precisamente cuando el sistema entra en régimen

por la radiación solar. Al confrontar las temperaturas del aire interior para cada día tipo de los meses indicados con la temperatura del aire exterior promedio, es posible advertir que la primera se eleva cerca de  $10^\circ\text{C}$  sobre la segunda. Esto supone un exitoso comportamiento del sistema para los días más fríos de la ciudad de Mendoza.

Posteriormente se simuló con el mismo modelo el comportamiento del sistema en las orientaciones Este y Oeste (E y O respectivamente) por ser alternativas de diseño en cuanto a la ubicación de las viviendas en la trama urbana de la ciudad de Mendoza.

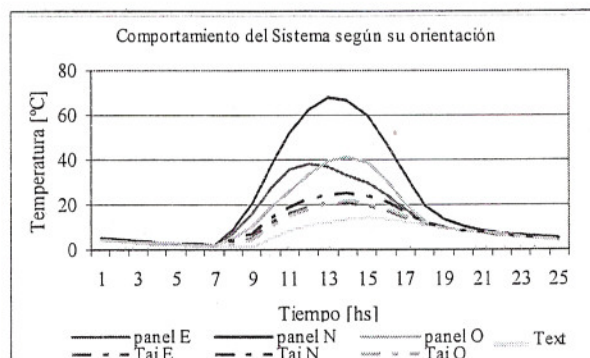


Fig.12. Respuesta térmica del sistema solar pasivo radiante en las orientaciones NE y O.

Los resultados expuestos en la figura 12, muestran que la temperatura del panel se eleva hasta  $40^\circ\text{C}$ , en las orientaciones anteriormente indicadas, en relación a los horarios de mayor radiación para cada orientación (por la mañana al este y por la tarde al oeste). Debido a las menores temperaturas alcanzadas por el panel en estas orientaciones (frente a  $70^\circ\text{C}$  en la orientación norte), el aumento de la temperatura del aire interior es significativamente menor que en el caso del sistema orientado al norte,  $5^\circ\text{C}$ . Sin embargo en situaciones extremas donde la orientación norte no se pueda resolver, el sistema con orientación Este y Oeste permite que las condiciones interiores sean  $6^\circ\text{C}$  más favorables que las condiciones de temperatura exterior.

#### 4.3. Construcción de prototipo escala 1=1 en un espacio.

A partir de los resultados obtenidos en las etapas previas se considera la propuesta como un sistema de acondicionamiento térmico viable para ser aplicado en espacios habitables, se construyó un prototipo escala 1=1. Este prototipo se montó en las instalaciones del taller del Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda (LAHV) perteneciente al Instituto de Ciencias Humanas Sociales y Ambientales (INCIHUSA) con sede en el predio del Centro Científico y Tecnológico de la provincia de Mendoza (CCT-CONICET Mza).

El taller está comprendido en un espacio prismático de  $6\text{m} \times 3\text{m}$  de lado y  $2.4\text{m}$  de alto. Las fachadas de mayor longitud se orientan hacia el norte y sur. El prototipo se ubicó hacia el lateral este del espacio debido a una resolución estructural concerniente al espacio del taller. La configuración del sistema responde al modelo escala 1=2, respetando los ángulos de captación y protección del mismo. La cara de captación del sistema de  $2.5\text{m} \times 0.6\text{m}$  orientada hacia el norte con un ángulo de inclinación de  $\beta=45^\circ$ . La altura de los tímpanos laterales resultó de  $0.65\text{m} \times 0.80\text{m}$  de base.



Estas medidas se calcularon a partir de un panel radiante de 0.85m x 2.5m. En la figura 13 se presenta una foto del prototipo del sistema sin el panel radiante incorporado, tomado desde el interior del espacio.

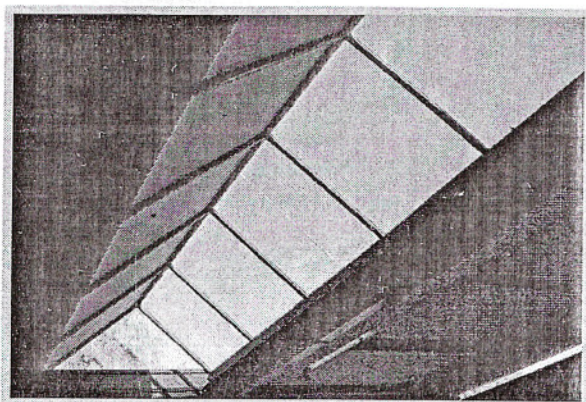


Fig. 13. Prototipo sin panel radiante.

Se colocaron esferas pintadas negras, según la metodología de globo negro de Fuller Moore, explicada anteriormente, en tres puntos a lo largo del eje medio transversal a la misma distancia unos de otros y a 1.3m del piso (Figura 14). Se ubicaron en el centro geométrico del panel (A), en el borde del panel (B) y hacia un lateral (C).

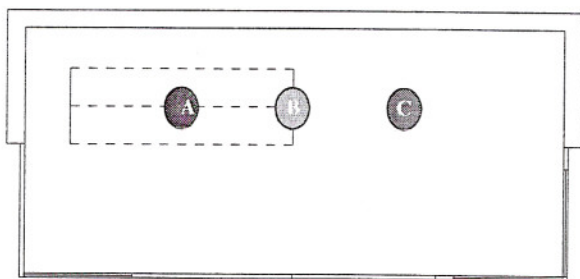


Fig. 14. Ubicación de los sensores de globo negro.

#### 4.3.1. Comportamiento térmico del espacio interior SIN panel radiante.

El período de medición estuvo comprendido entre el 14 y el 19 de julio de 2007, con el propósito de validar un modelo de simulación en el programa SIMEDIF y establecer el comportamiento térmico del espacio sin la incorporación del panel radiante. Las ventanas del espacio se bloquearon para impedir el ingreso de radiación solar directa.

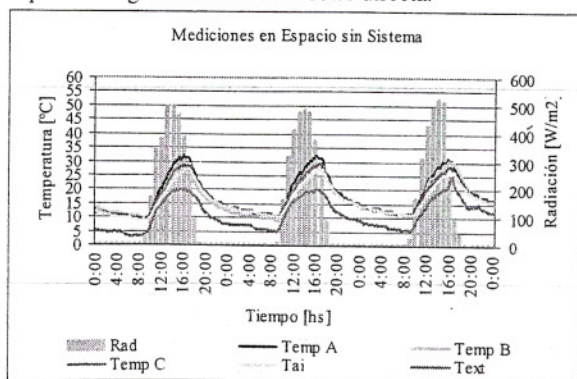


Fig. 15. Temperaturas de globo negro registradas en los puntos A, B y C., temperatura de aire interior y exterior y

radiación sobre plano horizontal para el espacio sin panel radiante incorporado.

En la figura 15 se presentan los datos experimentales para los días 14, 15 y 16 de julio, seleccionados por tratarse de días con cielo despejado. Para estos días las amplitudes térmicas exteriores fueron del orden de 15°C, con amplitudes térmicas similares en el espacio interior. Estas grandes amplitudes térmicas interiores reflejan la baja masa de acumulación del ambiente y la falta de ganancia solar directa proveniente del área vidriada. También se observa que las mayores temperaturas se registran en el punto A, debido a que recibe la mayor cantidad de radiación. La temperatura media del espacio para los días 14, 15 y 16 de julio es del orden de 15°C. El espacio se encuentra dentro de los límites de confort para el período diurno, mientras que durante la noche la temperatura baja hasta 10°C (con mínimas exteriores de 5°C)

Posteriormente se realizó la simulación térmica en SIMEDIF del local, integrando el espacio de taller y el espacio del sistema por no tener colocado el panel radiante que los separa. Se tomaron los datos meteorológicos (temperatura y radiación solar) medidos para el período de 5 días comprendido entre 14 y 18 de Julio del año 2007. Los cerramientos se consideraron de acuerdo a su composición como paredes de ladrillo macizo común y tabiques constituidos por MDF (Medium Density Fiberboard) al interior-aislación-chapa al exterior, con coeficiente de conducción de 0.9 W/m²C. Como coeficientes convectivos externos se empleó un valor de 10.3 W/m²C para paredes y tabiques que reciben radiación. Para el interior se fijaron en 5.7 W/m²C por tratarse de un espacio cerrado. Coeficientes calculados a partir de la ecuación que linealiza el  $h_r$  y  $h_c$  (eq. 2). El número de renovaciones de aire por hora se fijó en 1 para una situación de renovación normal.

$$h_{r-c} = 5.8 + 3.5 \times v \quad (2)$$

Siendo  $v$  la velocidad del aire (Duffie and Beckman, 1991)

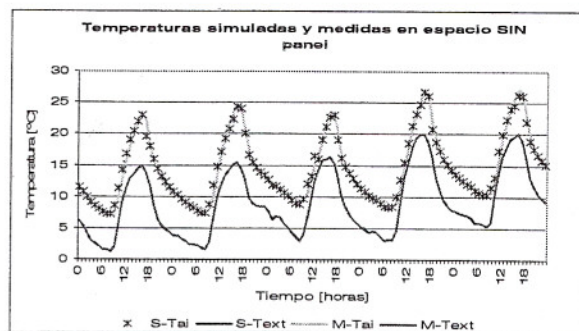


Fig.16. Temperaturas medidas del aire interior y exterior (M-Tai, MText y temperaturas simuladas (S-Tai) con SIMEDIF para el espacio sin la colocación del panel radiante.

En la figura 16 se observa que las temperaturas obtenidas por la simulación con SIMEDIF presentan respecto de los datos medidos una diferencia promedio de 0.5°C. El ajuste de los datos medidos y simulados resulta de  $R^2=0.9572$ , el modelo térmico de SIMEDIF permite reproducir adecuadamente el comportamiento del espacio. Sobre este modelo se simuló posteriormente el espacio bajo



condiciones meteorológicas que se presentaron durante las medidas del espacio con panel de chapa ondulada incorporado. De esta forma se obtiene una referencia del cuál sería el comportamiento térmico del espacio, para los mismos días, sin el sistema de calefacción en funcionamiento (con ganancia solar directa a través de la superficie captadora), para determinar el aporte del sistema radiante.

#### 4.3.2. Situación térmica interior del espacio de estudio CON panel radiante de chapa ondulada.

A continuación se colocó chapa ondulada como panel radiante, de 0.85m de ancho y 2.5m de largo (Figura 17), y se procedió a realizar las mediciones para un período de 14 días, desde el 29 de junio al 12 de julio de 2007.

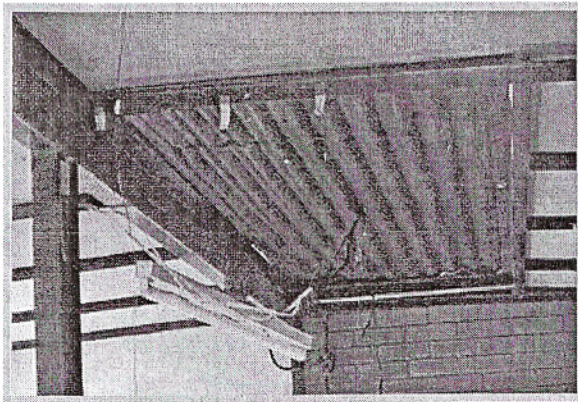


Fig. 17. Panel radiante de chapa ondulada.

En la figura 18 se presentan los registros de los días 10, 11 y 12 de julio, caracterizados por días claros con máximos de radiación al mediodía solar del orden de los 550 W/m<sup>2</sup> y bajas temperaturas exteriores (mínimas bajo cero y máximas de 10°C a 12°C).

En la figura 18 se aprecia la respuesta instantánea del panel a la radiación solar. La temperatura máxima de la chapa alcanza los 57°C una hora después del mediodía solar manteniéndose constante cerca de una hora. Se advierte también que la temperatura del panel desciende abruptamente cuando disminuye la radiación solar, debido a que el sistema no acumula calor.

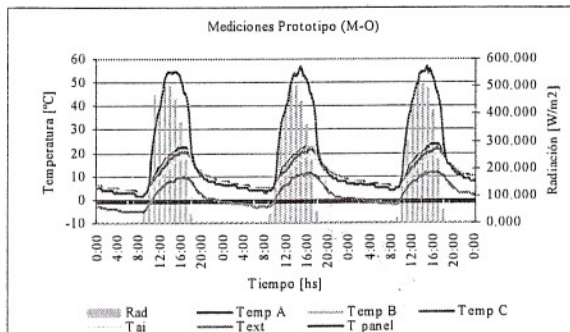


Fig. 18. Temperaturas registradas en el panel radiante, en los puntos de globo negro, temperatura de aire interior, exterior y radiación sobre plano horizontal. Experimentación con chapa ondulada como panel radiante.

Se observa también, en la figura 18, la reacción de los globos negros al estímulo radiante que llega desde el panel. Si se observa el curso térmico de los tres globos, elevan su temperatura por encima de la temperatura del aire (Tai), en 2°C el punto C, en 4°C el punto B y 5°C el punto A, en horas de radiación solar. En horas cercanas al mediodía solar, en el interior del espacio se registran temperaturas 12°C más altas que la temperatura exterior, siendo la misma diferencia que se obtuvo en el modelo escala 1=2, inclusive cuando la temperatura del panel (Tp) obtenida es menor (Tp modelo =70°C vs Tp prototipo=57°C).

Si se grafica TRM en relación a la Text (Figura 19), se puede concluir que para días de cielo claro una persona estará en confort dentro del espacio (TRM > 18°C) para temperaturas exteriores mayores a 8°C.

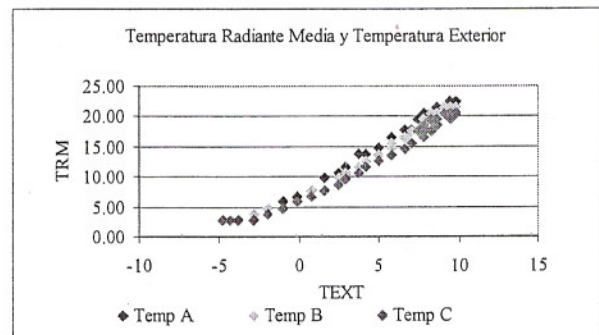


Fig. 19. Relación directa entre temperatura radiante media y temperatura exterior.

En términos energéticos, es posible calcular el calor radiante neto  $Q_{rad}$  (W) intercambiado por el sistema y las superficies interiores del espacio a partir de la ecuación 3.

$$Q_{rad} = \sigma \times A \times \varepsilon \times (t_1^4 - t_2^4) \quad (3)$$

Donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8}$  Wm<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>),  $A$  el área del panel en m<sup>2</sup>,  $\varepsilon$  la emitancia del panel,  $t_1$  la temperatura del panel en K y  $t_2$  la temperatura radiante media medida para el punto centro del espacio en K.

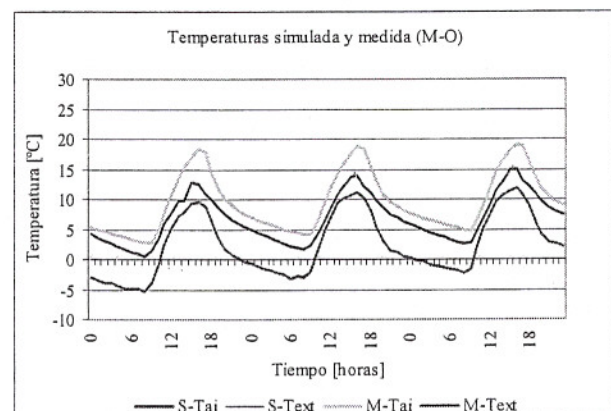


Fig. 20: Temperatura del aire interior simulada del espacio sin el sistema (S-Tai) y temperatura del aire interior medida con el sistema en funcionamiento (M-Tai)



Para  $A = 2.125\text{m}^2$ ,  $\varepsilon = 0.9$ ,  $t_i = 327\text{ K}$ ,  $t_j = 290\text{K}$ , el flujo energético neto entre el panel y el espacio es de  $560\text{W}$ , cuando la radiación solar es de  $510\text{W/m}^2$ . De este valor se desprende que  $42\text{W}$  lo recibe la persona (determinado por el factor de forma, según el método de Fanger  $f = 0.075$ ).

Por medio de la simulación del espacio con SIMEDIF, se calculó el comportamiento térmico del espacio bajo las mismas condiciones climáticas sin el sistema en funcionamiento. Los datos obtenidos sin el panel radiante colocado en el sistema (situación simulada S-Tai y S-Text) y con el panel radiante colocado (situación medida = M-Tai y M-Text) se presentan en la Figura 20.

La comparación muestra que con la utilización del panel radiante es posible elevar la temperatura operativa interior entre  $6-8^\circ\text{C}$  sobre la temperatura que tendría el espacio sin el panel y  $10-11^\circ\text{C}$  sobre la temperatura exterior.

Es posible inferir resultados satisfactorios un espacio de cualquier vivienda. Con el uso de este sistema de calefacción radiante solar pasivo se podría disminuir significativamente el consumo de energía convencional y el costo económico que supone para una familia tipo. Se reduciría además, la emisión de  $700\text{m}^3/\text{anual}$  de dióxido de carbono emitido a la atmósfera por esa vivienda.

## 5. CONCLUSIONES

La rehabilitación térmica es un paso fundamental en el mejoramiento de las condiciones de habitabilidad de la población de menores recursos. La necesidad de utilizar sistemas solares pasivos es urgente, para no acrecentar el consumo de las fuentes de energía fósiles y a su vez, minimizar las emisiones de  $\text{CO}_2$ .

El sistema presentado es una opción válida para esta situación, teniendo como valor agregado la independencia del factor norte sobre las fachadas. Su rendimiento ha sido estudiado en profundidad, a partir del análisis de los factores que interactúan en el intercambio radiante.

La incorporación del sistema de calefacción radiante solar pasivo es una herramienta para la transformación de las viviendas en edificios bioclimáticamente responsables con la realidad energética-ambiental mundial. Permite a la población de menores recursos vivir dentro de un rango de temperaturas apropiadas para su salud durante el día, sin la necesidad de otro mecanismo de calefacción. Es posible elevar la temperatura operativa interior  $7$  a  $8^\circ\text{C}$  sobre la temperatura exterior. Con el uso del sistema en una vivienda social se reduciría la cantidad de  $700\text{m}^3/\text{anual}$  de  $\text{CO}_2$  emitidos a la atmósfera.

## REFERENCIAS

- Athienitis A. K. Y Santamouris M., Thermal (2002) *Analysis and Design of Passive Solar Buildings*. London: James & James.
- Banhidi L. J. (1991). *Radiant Heating Systems*. New York, etc: Pergamon press.
- Duffie y Beckman (1991). *Solar Engineering of Thermal process*. Ed. J Wiley 2º Edición New York. "Methodology for Solar Radiation in Tilt Surfaces", LIU Y JORDAN.
- Evans, John M. (2005). Energía en el Hábitat Construido: Panorama en Argentina.
- Fanger P. O. (1970). *Thermal Confort*. Mc Denmark Copenagüe. Second edition, 1994
- Flores S.; Lesino G.; Saravia L.; Alia de Saravia D., 2000. Simedif para Windows, Revista AVERMA. Ed. INENCO UNSa. Salta. Presentado en el Congreso de ASADES. Octubre 2000. Argentina. [www.inenco.net/~seflores/](http://www.inenco.net/~seflores/)
- Fuller Moore Data Acquisition in Test Modules, *Journal Passive Solar*. 1, 4. 1982.
- Givoni B. (1992) Confort, Climat analysis and Building Design Guidelines. *Energy and Buildings*.
- Goulding, John R.; Lewis, J. Owen; Stecmbers, Theo O. (1994). Energy in architecture, *The European Passive Solar Handbook*, University College Dublin.
- Grossi Gallegos, Raúl Rhigini, 2004. Atlas de Energía Solar de la República Argentina. Secyt.
- Incropera F. P., Dewitt D. P. (1981) *Fundamentals of Heat Transfer*. New York, etc: John Wiley & Sons.
- Instituto provincial de la vivienda de la provincia de Mendoza. 2008. [www.ipvmendoza.com.ar](http://www.ipvmendoza.com.ar)
- IPV. [www.ipvmendoza.gov.ar](http://www.ipvmendoza.gov.ar)
- IRAM 11605, (1996) "Aislamiento térmico de edificios, Condiciones de habitabilidad en viviendas".
- ISO. ISO 7730 (1994) Moderate Thermal environments.
- Kreider and Kreith, (1981) *Solar Energy Handbook*, Editorial Mc Graw-Hill.
- Lazslo J.Bánhidi. (1991) *Radiant Heating Systems*. Design and Applications, Pergamon Press.
- M.V. Mercado, A. Esteves. (2006) Sistema De Calefacción Solar Radiante-Variables De Diseño Y Mediciones Experimentales ENTAC (Encontro Nacional de Tecnología no Ambiente Construido) 334 – 344 p.
- Martinez, C. (2004) Evaluación cualitativa de condiciones ambientales de viviendas del IPV en S. M. de Tucumán. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 8. ISSN 0329-5184
- Mercado M. V. y Esteves A. (2005) Sistema de calentamiento solar para viviendas de bajo costo sin fachada hacia el ecuador. Revista AVERMA N° · Ed. INENCO UNSa. Salta. La Plata Buenos Aires. Argentina.
- Mercado M. V., Esteves A. y Filippín C. (2007) Sistema de calefacción solar radiante. Mediciones Experimentales de Invierno y Evaluación con Software de simulación térmica SIMEDIF. Proceedings ENCAC. Ouro Preto Brasil.
- Mercado M. V., Esteves A., Filippín C. (2007) Sistema de climatización solar pasivo. Su integración en viviendas de bajo costo. Revista AVERMA N° 11. Ed. INENCO UNSa. San Luis. Argentina.
- Mesa N. A. (2008). La conservación, el aprovechamiento del potencial bioclimático y los programas de eficiencia energética como estrategia hacia la sustentabilidad urbana, en países sudamericanos. ANES. México.
- Mitchell Jorge. A. Esteves, Alfredo (2004) Diagnóstico de consumos energéticos de un asentamiento rural del oasis norte de Mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 8. ISSN 0329-5184.
- Mitchell, Jorge A. (2005) Consumo de energía para calefacción en el hábitat social de Mendoza un caso de estudio. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 9. ISSN 0329-5184.
- Olgyay Victor, (1998) *Arquitectura y Clima*. Editorial G. Gilli. Barcelona. España.